

KAJIAN NUMERIK DAN EKSPERIMENTAL PROSES PERPINDAHAN PANAS DAN PERPINDAHAN MASSA PADA PENGERINGAN

Ary Santony¹, Himsar Ambarita², Andianto P³., Mahadi⁴, Suprianto⁵, Dian M. Nasution⁶

^{1,2,3,4,5,6}Departemen Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Sumatera Utara

E-mail : santony.ary@gmail.com

ABSTRAK

Pengeringan merupakan proses perpindahan panas dan uap air secara simultan yang memerlukan energi panas untuk menguapkan kandungan air dari bahan yang akan dikeringkan. Penelitian ini dilakukan dengan cara eksperimen dan simulasi. Produk hasil pertanian, yaitu kentang dipilih sebagai objek penelitian ini. Penelitian secara eksperimen dilakukan dengan mengalirkan udara panas ke arah kentang dengan kecepatan, temperatur dan RH konstan. Kemudian data temperatur serta massa yang berubah pada kentang diukur dan dicatat secara otomatis menggunakan Agilent dan *Load Cell*. Selain melakukan eksperimen, penelitian ini juga melakukan simulasi untuk menampilkan distribusi temperatur yang terjadi pada kentang selama pengeringan dan membandingkan hasil yang diperoleh secara numerik dengan hasil yang diperoleh secara eksperimen. Simulasi dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak CFD yaitu Ansys Fluent 14.5. Pada hasil eksperimen, diperoleh bahwa temperatur cenderung meningkat apabila waktu pengeringan bertambah. Temperatur awal kentang adalah 301,11 K. Temperatur tertinggi setelah dua jam melakukan pengeringan terletak pada permukaan kentang, yaitu 316,304 K. Sedangkan temperatur pada titik tersebut yang diperoleh dari hasil simulasi adalah 316,972 K. Pada eksperimen, massa kentang cenderung berkurang apabila waktu pengeringan bertambah. Massa awal kentang sebelum dikeringkan adalah 75 gr. Hasil pengukuran massa kentang setelah dua jam melakukan pengeringan adalah 63 gr. Sedangkan massa kentang yang diperoleh dari hasil simulasi adalah 66,58 gr. Sehingga diperoleh ralat antara hasil eksperimen dan numerik berturut-turut pada pengukuran temperatur dan massa adalah 0,21% dan 5,09%.

Kata kunci : Pengeringan, Perpindahan Panas, Penguapan, CFD.

1. PENDAHULUAN

Pengeringan merupakan proses mengurangi kadar air dari objek yang dikeringkan. Proses ini sudah dikenal dan digunakan manusia sejak jaman dahulu. Pengeringan adalah proses perpindahan massa air dari suatu zat padat atau semi padat dengan melalui proses penguapan. Dalam industri, proses pengeringan sering kali merupakan tahap akhir proses produksi sebelum dikemas atau dijual ke konsumen.

Pada awalnya proses pengeringan hanya ditujukan untuk mengawetkan makanan. Tetapi, saat ini proses pengeringan telah berkembang luas pada bidang lain seperti agroindustri, kimia, biokimia, farmasi, dan industri kertas.

Metode pengeringan juga semakin berkembang, yaitu tidak hanya sekedar mengurangi kadar air tetapi juga mengontrol proses pengeringan untuk mendapatkan kualitas produk pengeringan yang lebih baik.

Selama beberapa dekade terakhir, penelitian telah banyak dilakukan untuk menjelaskan hal-hal yang berhubungan dengan proses pengeringan dan perubahan-perubahan yang terjadi selama proses pengeringan.

Tujuan utamanya adalah untuk menghasilkan proses - proses pengeringan yang lebih efektif dan efisien. Diperkirakan kurang lebih 250 paten Amerika dan 80 paten Eropa telah diterbitkan setiap tahunnya. Hal ini menunjukkan pengeringan merupakan salah satu bidang ilmu yang sedang berkembang dengan pesat.

Salah satu tantangan yang saat ini masih terus mendapat perhatian adalah bagaimana memodelkan proses pengeringan. Dengan mengetahui model pengeringan yang baik, diharapkan

dapat melakukan perbaikan pada desain mesin pengering dan penentuan proses pengeringan yang lebih baik dan efisien.

2. TINJAUAN PUSTAKA

Pengeringan dapat diartikan memindahkan atau mengambil kandungan zat cair dari benda padatnya, zat cair yang biasa kita pindahkan dari zat padat adalah air. Sedangkan zat padat biasanya bermacam-macam, contohnya pada pabrik pengolahan makanan, khususnya pabrik yang mengolah manisan buah-buahan kering, maka proses pengeringan akan diaplikasikan untuk mengurangi kandungan air yang ada pada buah-buahan tersebut, maka yang bertindak sebagai zat padat adalah buah tersebut, sedangkan yang menjadi zat cairnya adalah air yang berada dalam buah tersebut.

Faktor - faktor yang mempengaruhi pengeringan adalah sebagai berikut :

1. Luas permukaan
2. Suhu
3. Kecepatan udara
4. Kelembaban udara (*Relative Humidity*)
5. Tekanan udara
6. Waktu

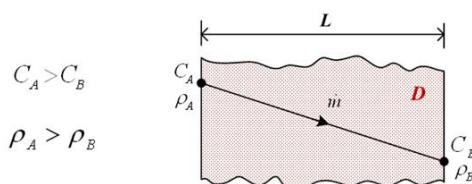
2.1 Perpindahan Panas dan Perpindahan massa

Perpindahan panas terjadi karena ada perbedaan temperatur. Perpindahan panas dapat terjadi melalui 3 cara, yaitu konduksi, konveksi dan radiasi.

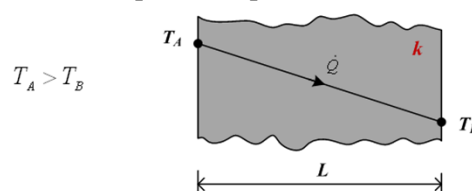
Perpindahan massa dapat dianalogikan dengan perpindahan panas. Massa yang berpindah (berdifusi) dapat dianggap sebagai panas dan tempat massa berdifusi disebut medium. Perpindahan massa hanya dibagi atas perpindahan massa konduksi dan perpindahan massa konveksi, dengan kata lain tidak ada perpindahan massa radiasi.

Perpindahan massa terjadi karena adanya perbedaan konsentrasi pada suatu medium. Proses perpindahan massa dan biasa disebut difusi massa (*mass diffusion*) sangat mirip dengan proses perpindahan panas, jika pada perpindahan panas dapat dijelaskan dengan hukum Fourier dimana perbedaan temperatur sebagai gaya pendorong (*driving force*), maka perpindahan massa dijelaskan dengan hukum Fick dengan perbedaan konsentrasi sebagai *driving force*.

Pada permukaan plat yang masing - masing mempunyai temperatur constant yang berbeda, permukaan A dan permukaan B, seperti yang ditampilkan pada gambar 1, perpindahan panas akan terjadi dari permukaan yang tinggi ke temperatur yang lebih rendah. Hal yang sama akan terjadi pada plat yang mempunyai konsentrasi yang berbeda pada masing-masing permukaannya. Perpindahan massa akan terjadi dari permukaan yang mempunyai konsentrasi tinggi ke permukaan yang mempunyai konsentrasi lebih rendah.



Gambar 1 Perpindahan panas secara konduksi



Gambar 2 Perpindahan massa secara konduksi

Perpindahan panas konduksi dapat dihitung dengan menggunakan hukum Fourier, persamaannya adalah sebagai berikut :

$$\dot{Q}_{kon} = -kA \frac{dT}{dx} = kA \frac{(T_A - T_B)}{L} \dots\dots(1)$$

Dimana :

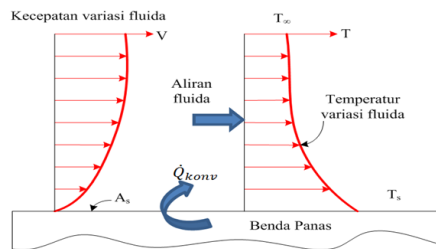
- \dot{Q}_{kon} = Laju perpindahan panas konduksi (W)
- k = Konduktivitas thermal bahan (W/m.K)
- A = Luas penampang perpindahan panas (m²)
- T_A = Temperatur pada titik A (K)
- T_B = Temperatur pada titik B (K)
- L = Ketebalan dinding benda (m)

Perpindahan massa dapat dihitung dengan menggunakan hukum difusi Fick atau biasa disebut *Fick's Law of Diffusion*, dalam basis mol dirumuskan dengan :

$$\dot{N} = -DA \frac{dC}{dx} = DA \frac{(C_A - C_B)}{L} \dots\dots(2)$$

Dimana :

- \dot{N} = Laju perpindahan massa (mol/det)
- D = Koefisien difusi massa suatu zat pada mediumnya (m²/det)
- A = Luas penampang perpindahan massa (m²)
- C_A = Konsentrasi pada titik A (mol/m³)
- C_B = Konsentrasi pada titik B (mol/m³)
- L = Ketebalan dinding benda (m)



Gambar 3 Perpindahan massa secara konveksi

Secara matematis, perpindahan panas konveksi pada permukaan benda dapat dirumuskan sebagai berikut :

$$\dot{Q}_{konv} = hA_s(T_s - T_\infty) \dots\dots\dots(3)$$

Dimana :

- \dot{Q}_{konv} = Laju perpindahan panas konveksi (W)
- h = Koefisien perpindahan panas konveksi (W/m².K)
- A_s = Luas penampang perpindahan panas (m²)
- T_s = Temperatur permukaan benda (K)
- T_∞ = Temperatur fluida yang mengalir (K)

Dengan analogi yang sama, perpindahan massa dapat dirumuskan dengan persamaan :

$$\dot{m}_{evap} = h_m A(\rho_s - \rho_\infty) \dots\dots\dots(4)$$

Dimana :

- \dot{m}_{evap} = Laju penguapan (kg/det)

- h_m = Koefisien perpindahan massa konveksi (m/det)
- A = Luas penampang perpindahan panas (m²)
- ρ_s = Massa jenis pada permukaan benda (kg/m³)
- ρ_∞ = Massa jenis fluida yang mengalir (kg/m³)

2.2 Analogi Chilton-Colburn

Bagi fluida yang mempunyai sifat $Pr \neq Sc \neq 1$, Chilton dan Colburn (1943) mengajukan persamaan berikut [3] :

$$\frac{f}{2} = St Pr^{2/3} = St_m Sc^{2/3} \dots\dots\dots(5)$$

Dengan menggunakan analogi ini, maka koefisien perpindahan massa dan perpindahan panas dapat dihubungkan menjadi persamaan berikut :

$$\frac{St}{St_m} = \left(\frac{Sc}{Pr}\right)^{2/3} \dots\dots\dots(6)$$

Atau jika dikembangkan lagi, maka persamaan xxx menjadi sebagai berikut :

$$\frac{h}{h_m} = \rho.c \left(\frac{Sc}{Pr}\right)^{2/3} = \rho.cp \left(\frac{\alpha}{D}\right)^{2/3} = \rho.cp.Le^{2/3} \dots(7)$$

Dimana :

- ρ = Massa jenis fluida kerjanya (kg/m³)
- cp = Kapasitas panas (J/kg.K)
- Le = Bilangan Lewis

2.3 Computational Fluid Dynamics (CFD)

Computational Fluid Dynamics (CFD) adalah suatu cabang dari mekanika fluida yang menggunakan metode numerik untuk menyelesaikan dan menganalisa elemen-elemen yang akan disimulasikan. CFD dibangun atas beberapa persamaan yang dikenal dengan istilah “*Governing Equations*”. Untuk kasus 2D persamaan tersebut ditunjukkan oleh persamaan (8), (9), (10) dan (11) sebagai berikut :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} = 0 \dots\dots\dots(8)$$

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\mu}{\rho} \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \dots(9)$$

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\mu}{\rho} \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) \dots(10)$$

$$u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} = \frac{k}{\rho c} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) \dots(11)$$

3 METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Bahan

Objek yang menjadi penelitian ini adalah produk hasil pertanian, yaitu kentang. Kentang dipilih karena tidak memiliki biji, dan dimensi yang diperoleh setelah dipotong dan dibentuk mencukupi untuk dimasukkan pada sterefoam yang sudah dibentuk. Dimensi kentang setelah dipotong dan dibentuk adalah 52 x 50 x 24 mm, dapat dilihat pada gambar 4.

Edisi Cetak Jurnal Dinamis, Maret 2017 (ISSN: 0216-7492)



Gambar 4 Kentang yang sudah dipotong dan dibentuk

3.2 Alat Ukur

Alat ukur yang digunakan untuk mengukur variabel - variabel penelitian, antara lain :

- a. Agilent
- b. *Load Cell*
- c. RH Meter

3.3 Alat

Peralatan yang digunakan pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

- a. Blower
- b. Stabilizer
- c. *Drying Chamber*
- d. Sterefoam
- e. Seperangkat Komputer

3.4 Prosedur Eksperimental

Prosedur eksperimental dapat diuraikan sebagai berikut :

1. Proses *assembling* alat pengering. Blower dihubungkan ke stabilizer, dan pada blower dipasang dengan *drying chamber* di tempat keluaran udara blower dan *load cell* dipasang pada tempat yang telah ditentukan.
2. RH meter dihubungkan ke komputer terlebih dahulu yang bertujuan untuk melakukan pengaturan interval waktu terhadap data yang akan direkam. Kemudian RH meter digantungkan di dalam *drying chamber* di dekat sumber udara panas.
3. Kemudian dipasang termokopel (5 titik) pada kentang. Agilent diaktifkan dan diatur sehingga data-data temperatur tersimpan secara otomatis.
4. *Load cell* dhubungkan ke komputer terlebih dahulu untuk melakukan pengaturan pada data yang akan direkam dengan interval waktu yang ditentukan.
5. Blower diaktifkan selama 10 menit agar temperatur udara tidak mengalami kenaikan dan penurunan temperatur sebelum melakukan percobaan, dapat dilihat pada gambar 5.



Gambar 5 Blower diaktifkan selama 10 menit

6. Kentang yang sudah dipasang temokopel diletakkan di sterefoam dan kemudian digantungkan pada *load cell*, dapat dilihat pada gambar 6.



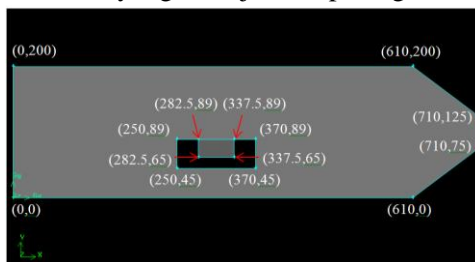
Gambar 6 Kentang digantungkan pada *load cell*

7. Pengujian dilakukan selama rentang waktu yang ditentukan, kemudian data-data yang diperoleh dari *load cell* dan RH Meter diolah di komputer.

3.5 Prosedur Numerik

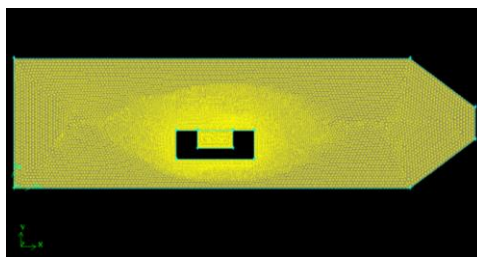
Prosedur numerik dapat diuraikan sebagai berikut :

1. Pemodelan dilakukan dengan proses penggambaran *drying chamber*, *sterefoam* dan *kentang* dalam bentuk gambar 2D sesuai dengan dimensi yang dilakukan pada eksperimen. Penggambaran dilakukan dengan menggunakan *software* Gambit 2.4. Pemodelan geometri dapat dilihat pada gambar 7. Titik koordinat yang ditunjukkan pada gambar 7 dalam satuan mm.



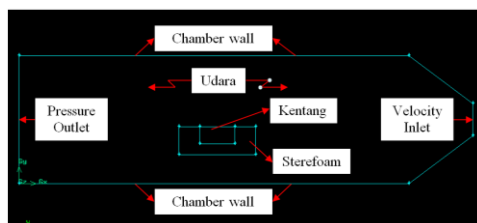
Gambar 7 Pemodelan geometri dengan *software* Gambit 2.4

2. Setelah itu, lakukan pembagian objek menjadi bagian-bagian kecil disebut dengan *meshing*. Hasil *meshing* yang dilakukan dapat dilihat pada gambar 8.

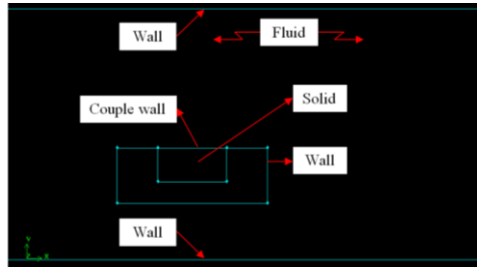


Gambar 8 Tampilan *mesh* yang telah dibuat dengan *software* Gambit 2.4

3. Langkah selanjutnya adalah menetapkan *boundary condition* atau kondisi batas. Untuk memperjelas letak kondisi batas pada penelitian ini selengkapnya ditampilkan pada gambar 9 dan gambar 10, serta dijelaskan pada tabel 1.



Gambar 9 Letak kondisi batas pada model

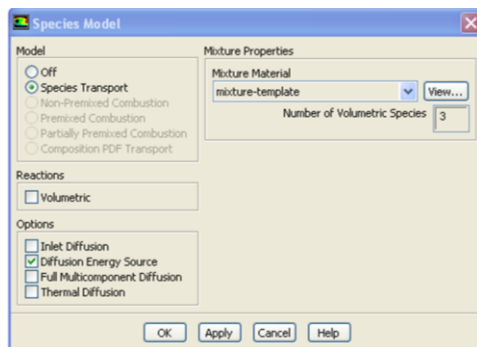


Gambar 10 Dinding kopel antara fluida dan solid

Tabel 1 Kondisi Batas

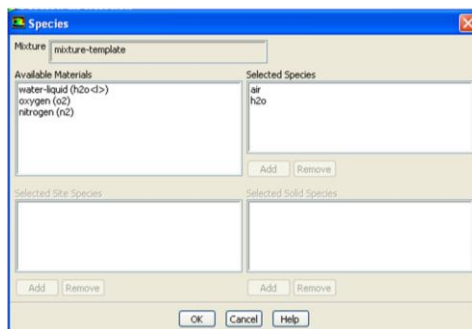
Kondisi batas	Jenis	Nilai
Inlet	<i>Velocity Inlet</i>	Kecepatan 0,35 m/s RH : 20% Temperatur 57,5 K
Outlet	<i>Pressure Outlet</i>	-
Chamber Wall	<i>Wall</i>	-
Sterefoam	<i>Solid</i>	$k = 0,033$ W/m.K $\rho = 0,05$ g/cm ³ $C_p = 1300-1500$ J/kg.°C
Udara	<i>Fluid</i>	Mixture-template
Kentang	<i>Solid</i>	$k = 0,49$ W/m.K $\rho = 1212$ g/cm ³ $C_p = 3660$ J/kg.°C
Dinding kopel	<i>Couple Wall</i>	

- Setelah kondisi batas ditetapkan di Gambit, langkah akhir yang dilakukan di Gambit adalah meng-*export mesh* menjadi file dengan format .msh. File ini selanjutnya akan dibuka di Fluent.
- Untuk mengatur fluida kerja, diperlukan untuk mengaktifkan model *species transport* dan kemudian dipilih *mixture template* pada *mixture material*. *Species transport* berfungsi untuk menentukan fluida menjadi campuran dari uap air dan udara, sehingga RH pada fluida dapat ditentukan. Tampilan dari langkah mengaktifkan *species transport* ditunjukkan pada gambar 11.



Gambar 11 Mengaktifkan *species transport*

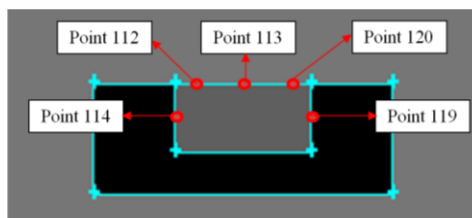
- Jenis material *mixture* harus diatur sehingga hanya ada material uap air (h_2o) dan udara (*air*) yang terkandung dalam material *mixture*, langkah ini dapat dilihat pada gambar 12.



Gambar 12 Pengaturan material *mixture*

4 HASIL DAN PEMBAHASAN

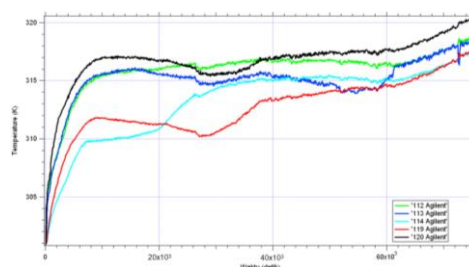
Berikut gambar peletakan titik termokopel, dapat dilihat pada gambar 13.



Gambar 13 Letak titik termokopel pada kentang

4.1 Temperatur pada Kentang

Data temperatur yang diambil sebagai acuan dalam mensimulasikan proses pengeringan yaitu pada tanggal 12 Mei 2014. Data diambil dengan menggunakan alat Agilent untuk merekam perubahan temperatur yang terjadi setiap 1 menit pada lokasi 5 titik termokopel yang telah ditentukan pada gambar 14. Grafik perubahan temperatur yang terjadi pada setiap titik termokopel dapat dilihat pada gambar 14.

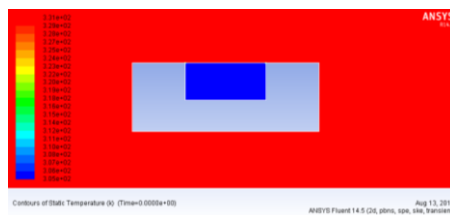


Gambar 14 Perubahan temperatur pada titik temokopel yang berbeda

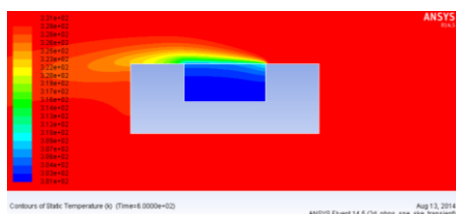
Pada gambar 14 dapat dilihat bahwa temperatur cenderung meningkat apabila waktu pengeringan bertambah.

Temperatur yang paling tinggi terletak pada titik 120 yang berada pada permukaan kentang dikarenakan posisi ini bersentuhan dengan udara panas secara langsung serta mengalami laju perpindahan panas konduksi terbesar dan temperatur yang paling rendah terletak pada titik 114 dikarenakan posisi ini tidak bersentuhan dengan udara panas secara langsung serta mengalami laju perpindahan panas konduksi yang paling kecil.

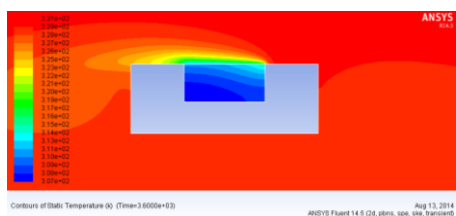
Temperatur yang dihasilkan dari proses simulasi dapat dilihat pada gambar 15, 16, 17 dan 18.



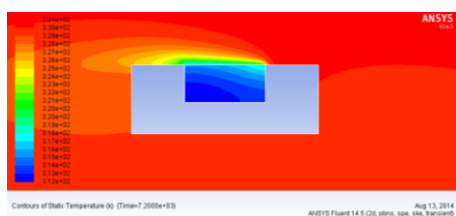
Gambar 15 Distribusi kontur temperatur awal pada kentang



Gambar 16 Kontur temperatur pada kentang yang diperoleh dari hasil simulasi setelah 600 detik proses pengeringan



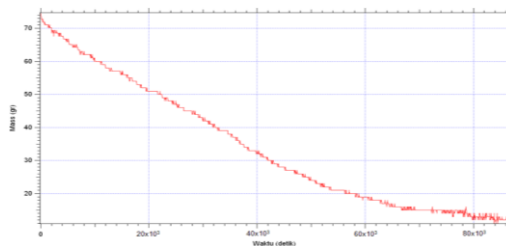
Gambar 17 Kontur temperatur pada kentang yang diperoleh dari hasil simulasi setelah 3600 detik proses pengeringan



Gambar 18 Kontur temperatur pada kentang yang diperoleh dari hasil simulasi setelah 7200 detik proses pengeringan

4.2 Massa pada Kentang

Selama proses pengeringan dilakukan, maka massa kentang akan mengalami penurunan secara terus menerus. Hal ini disebabkan adanya perpindahan massa, pada kasus pengeringan ini yang terjadi adalah menguapnya kandungan air yang terdapat pada kentang tersebut. Grafik perubahan massa kentang yang pengujiannya dilakukan pada tanggal 12 Mei 2014 dapat dilihat pada gambar 19.



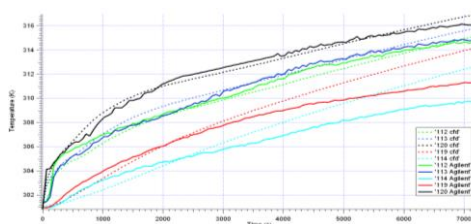
Gambar 19 Perubahan massa kentang selama proses pengeringan

Dari gambar 19 menunjukkan bahwa massa kentang semakin menurun apabila waktu pengeringan bertambah. Pada akhir grafik, penurunan massa pada kentang tidak lagi terjadi, ini disebabkan oleh kadar air dalam kentang yang sudah habis, sehingga tidak ada proses perpindahan massa yang terjadi pada kentang.

4.3 Validasi Terhadap Eksperimen

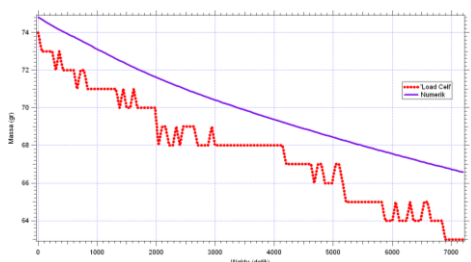
Validasi dilakukan dengan membandingkan antara hasil dari analisa numerik dengan data hasil eksperimen. Hal ini perlu dilakukan untuk mengetahui keabsahan hasil simulasi yang telah dilakukan dengan menggunakan *software*.

Pada gambar 20 menunjukkan perbandingan temperatur antara hasil dari analisa numerik dan hasil dari eksperimen yang dilakukan pada tanggal 12 Mei 2014.



Gambar 20 Grafik perbandingan temperatur antara hasil dari analisa numerik dan hasil eksperimen yang dilakukan pada tanggal 12 Mei 2014

Setelah hasil temperatur dibandingkan, maka selanjutnya yang perlu untuk dibandingkan adalah hasil perbandingan massa kentang sebelum dan sesudah terjadinya proses pengeringan. Pada gambar 21 menunjukkan perbandingan massa antara hasil dari analisa numerik dan hasil dari eksperimen yang dilakukan pada tanggal 12 Mei 2014.



Gambar 21 Grafik perbandingan massa antara hasil dari analisa teoritis dan eksperimen yang dilakukan pada tanggal 12 Mei 2014

5 KESIMPULAN

Adapun kesimpulan yang diperoleh dari pengujian ini adalah sebagai berikut :

1. Temperatur pada setiap titik termokopel meningkat apabila waktu pengeringan bertambah.
2. Massa kentang semakin menurun apabila waktu pengeringan bertambah.
3. Hasil pengukuran temperatur setelah dua jam proses pengeringan pada permukaan kentang yang bersentuhan dengan aliran udara secara langsung berdasarkan hasil eksperimen pada point 112, 113 dan 120 berturut-turut adalah 314,723 K, 315,038 K dan 316,304 K, sedangkan hasil pengukuran berdasarkan simulasi adalah 315,172 K, 315,834 K dan 316,972 K. Perbedaan ralat yang terjadi adalah 0,14%, 0,25% dan 0,21%.
4. Hasil pengukuran temperatur setelah dua jam proses pengeringan pada bagian kiri dan kanan kentang yang tidak bersentuhan dengan aliran udara berdasarkan hasil eksperimen pada point 114 dan 119 berturut-turut adalah 309,787 K dan 311,320 K, sedangkan hasil pengukuran berdasarkan simulasi adalah 312,681 K dan 314,203 K. Perbedaan ralat yang terjadi adalah 0,93% dan 0,93%.
5. Hasil pengukuran massa kentang setelah dua jam proses pengeringan berdasarkan hasil eksperimen adalah 63 gr. Sedangkan massa kentang yang diperoleh dari hasil simulasi adalah 66,58 gr. Perbandingan hasil pengukuran massa pada eksperimen dan teoritis mengalami perbedaan ralat 5,09.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Ambarita, Himsar. 2011. *Buku Kuliah Pendingin (Komponen SKU)*. Medan : Departemen Teknik Mesin FT USU.
- [2] Ambarita, Himsar. 2011. *Buku Kuliah Perpindahan Panas Konduksi (penyelesaian analitik dan numerik)*. Medan : Departemen Teknik Mesin FT USU.
- [3] Ambarita, Himsar. 2011. *Perpindahan Panas Konveksi dan Pengantar Alat Penukar Kalor*. Medan : Departemen Teknik Mesin FT USU.
- [4] Cengel, Y.A. *Heat Transfer A Practical Approach, Second Edition*. Mc Graw-Hill, Book Company, Inc : Singapore.
- [5] Corrales, L.V, Prieto, J.J.R, Hernandez, E.G. 2009. *Numerical and Experimental Analysis of Heat and Moisture Transfer During Drying of Ataulfo Mango*. Journal of Food Engineering : Elsevier.
- [6] <http://majarimagazine.com/2008/12/teknologi-pengeringan-bahan-makanan/>
- [7] <http://westryantindaon.blogspot.com/2013/07/pengeringan.html>
- [8] http://www.slideshare.net/frans_iskaputeri/itp-uns-semester-3-mesin-dan-peralatan-pengeringan
- [9] Incropera, Frank P., David P. De Witt. 1985. *Fundamentals of Heat and Mass Transfer, Second Edition*. John Wiley & Sons Inc. : New York.
- [10] Kaya, A., et al. 2005. *Numerical Modeling of Heat and Mass Transfer During Forced Convection Drying of Rectangular Moist Object*. Journal of Heat and Mass Transfer : Elsevier.